

Pure pursuit 알고리즘 기반 모바일 로봇의 경로 추종 성능 분석

양승건 · 이주영 · 김현수 · 임승찬*

한경대학교

Path Following Performance of Pure Pursuit Algorithm-Based Mobile Robot

Seung Geon Yang · Juyoung Lee · Hyeonsoo Kim · Seung-Chan Lim*

Hankyong National University

E-mail : tmdrjs1543@naver.com / juyoung05@hanmail.net / julie019@naver.com / sclim@hknu.ac.kr

요 약

경로 추종 알고리즘은 행성 탐사, 무인 배송, 자율 주행 등의 다양한 모바일 플랫폼에 대하여 많은 연구가 수행되었다. 하지만, 환경에 존재하는 불확실성으로 인해 실제 응용 분야에서 높은 정확도를 보장하기 어렵다. 본 논문에서는 pure pursuit 알고리즘으로 제어되는 모바일 로봇의 경로 추종 성능을 분석함으로써 알고리즘 설계 및 구현에 대한 지침을 도출하는 것을 목표로한다. 이를 위해, 전방 주시 거리 (look ahead distance)를 설정하고 오류가 있는 액추에이터를 장착할 때, pure pursuit 알고리즘의 추종 정확도를 전산 실험을 통해 평가한다.

ABSTRACT

Path following algorithms have been intensively studied for various mobile platforms such as planetary exploration, unmanned delivery, and autonomous driving. However, ensuring high accuracy in practical applications is challenging due to enormous uncertainty inherent in real environment. In this paper, we aim to reveal the guideline for the design and implementation by investigating the path following performance of mobile robot controlled by the pure pursuit algorithm. To this end, we evaluate the accuracy of the pure pursuit algorithm when tuning the look ahead distance and deploying erroneous actuator.

키워드

Autonomous driving, differential drive, mobile robot, pure pursuit algorithm.

1. 서 론

자율 주행이 행성 탐사, 무인 배송 등의 다양한 분야에 응용되면서 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다 [1]. 모바일 로봇 플랫폼은 자율주행의 대표적인 응용 분야로서 로봇이 센서를 통해 외부 환경을 스스로 인지하고 액추에이터(actuator)를 통해 정확한 물리적 동작을 수행해야 한다. 또한, 사전에 설정되거나 계획된 경로를 로봇이 정확하고 빠르게 추종하는 것도 모바일 로봇 시스템의 중요한 목표이다. 그동안 정확한 경로 추종을 위한

고급 제어 알고리즘이 다수 개발되었지만, 제어 파라미터 설정에 따른 민감성을 극복하기 위하여 많은 시간과 노력이 필요한 실정이다 [2], [3]. 또한, 실제 외부 환경 및 하드웨어에 존재하는 불확실성의 영향을 극복함으로써 우수한 추종 성능을 달성하기 위해서는 세밀한 제어 시스템의 설계 및 파라미터 설정이 필요하다 [4].

본 논문에서는 pure pursuit 알고리즘을 통해 주어진 경로를 추종하는 모바일 로봇 시스템을 고려하고, 주요 제어 파라미터 설정에 따른 추종 성능 및 파라미터 특성을 분석한다. Pure pursuit 알고리즘은 자율주행 분야에서 고려하는 대표적인

* corresponding author

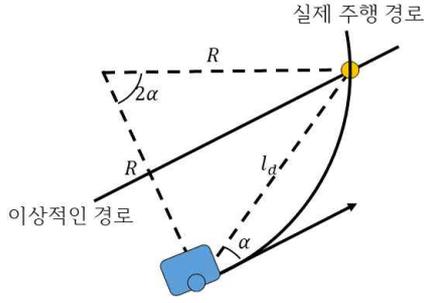


그림 1. Pure pursuit 제어의 개념도.

기하학적 추종 알고리즘으로서 전방 주시 거리 (look ahead distance)의 설정이 추종 성능에 큰 영향을 미친다 [5]. 따라서, 전방 주시 거리의 설정에 따른 추종 성능을 시뮬레이션을 통해 분석함으로써 pure pursuit 알고리즘의 경로 추종 성능 및 제어 파라미터 특성을 파악한다. 더 나아가, 모바일 로봇의 구동 및 주행을 위한 액추에이터에 오류가 포함된 상황을 모델링함으로써 시스템에 존재하는 불확실성에 대한 pure pursuit 알고리즘의 경로 추종 성능을 확인한다.

II. 모바일 로봇 시스템 모델

본 논문에서는 여러 개의 지상점 (waypoints)으로 구성된 이상적인 경로가 주어져 있는 상황에서 제어 알고리즘에 기반한 경로 추종 문제를 다룬다. 본 논문에서 고려하는 모바일 로봇 시스템에서는 로봇이 pure pursuit 알고리즘을 통해 각속도를 제어하고, 차동 구동형 주행 (differential wheeled drive) 모델을 통해 주행을 가정한다.

Pure pursuit 알고리즘은 기하학적 경로 추종 제어 기법으로서 차량 운동학의 기하학적 구조와 기준 경로만을 사용하여 다음 경로를 추적하는 알고리즘이다. 그림 1은 pure pursuit 제어의 개념도로써 노란색 점은 추종 목표 지점을 뜻한다. 로봇의 전방 주시 거리 l_d 를 현재 위치로부터 추종 목표 지점까지의 거리로 설정한다. 또한, 모바일 로봇이 반지름이 R 인 원운동을 한다고 예측할 때, 로봇의 방향과 예측경로가 이루는 각도를 α 로 표기한다. 이때, 모바일 로봇이 이상적인 경로를 추종하기 위하여 설정되는 각속도 w_I 를 아래의 식을 이용하여 제어할 수 있다 [5]:

$$\frac{l_d}{\sin(2\alpha)} = \frac{R}{\sin(\frac{\pi}{2}-\alpha)}$$

$$\Rightarrow w_I = \frac{1}{R} = \frac{2\sin(\alpha)}{l_d}$$

위의 식을 통하여 모바일 로봇의 각속도 w_I 의 제어에 전방 주시 거리 l_d 의 설정이 큰 영향을 끼친다는 사실을 알 수 있다. 일반적으로 l_d 를 짧게

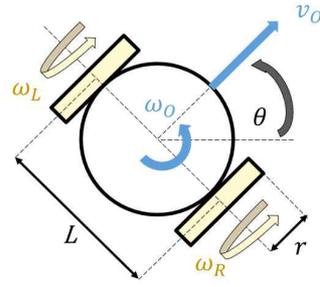


그림 2. 차동 구동형 주행 모델의 개념도.

설정하면 빠른 피드백으로 인해 추적 정확도가 높아지지만, 급격한 경로 변화로 인해 오버슈팅이 발생할 수 있다. 반대로, l_d 를 길게 설정하면 오버슈팅이 완화되어 부드러운 경로로 수렴하지만, 급격한 경로 변화에 대해 더 큰 곡률이 발생하여 추적 정확도가 열화된다. 따라서 전방 주시 거리를 적절히 설정함으로써 최대의 추적 정확도를 효율적으로 달성하는 것이 pure pursuit 알고리즘 기반의 경로 추적에서 중요한 설계 문제이다 [3].

그림 2는 독립적인 두 개의 바퀴가 장착된 모바일 로봇의 차동 구동형 주행 모델을 보여주며, 각 바퀴는 독립적으로 전진 또는 후진 주행이 가능하다. 양쪽 바퀴의 반지름은 r 로써 같고, 두 바퀴 사이의 거리는 L 이다. 경로 제어를 위하여 앞서 결정된 각속도 w_I 와 모바일 로봇의 선속도 v_I 가 입력되면, 왼쪽과 오른쪽 바퀴의 각속도 w_L 과 w_R 이 다음의 식으로 각각 결정된다:

$$w_L = \frac{1}{r}(v_I - \frac{w_I L}{2}),$$

$$w_R = \frac{1}{r}(v_I + \frac{w_I L}{2}).$$

양쪽 바퀴의 각속도가 결정됨으로써 모바일 로봇은 다음과 같이 계산되는 선속도 v_O 와 각속도 w_O 에 의해 주행한다:

$$v_O = \frac{r}{2}(w_R + w_L),$$

$$w_O = \frac{r}{L}(w_R - w_L).$$

위 식의 차동 구동형 주행 모델은 이상적인 액추에이터를 가정한다. 하지만, 액추에이터에 하드웨어적 결함이 있거나 외부 환경의 불확실성이 존재한다면, 실제 구동에 불가피한 오류가 발생할 수 있다 [4]. 이러한 경우를 모델링하기 위하여 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 가우시안 확률변수 n_v 와 n_w 가 첨가되는 잡음 모델을 가정할 때, 실제 구동되는 선속도 \tilde{v}_O 와 각속도 \tilde{w}_O 는 다음과 같이 표현된다:

$$\tilde{v}_O = v_O + n_v,$$

$$\tilde{w}_O = w_O + n_w.$$

표 1. 시뮬레이션 파라미터

파라미터	값
지상점	(0,0), (2,2), (4,2), (2,4), (0.5,3)
l_d	{0.06, 0.35, 0.5, 1}
r	0.1 m
L	0.5 m
ν_I	0.75 m/s
σ^2	{0, 0.5}

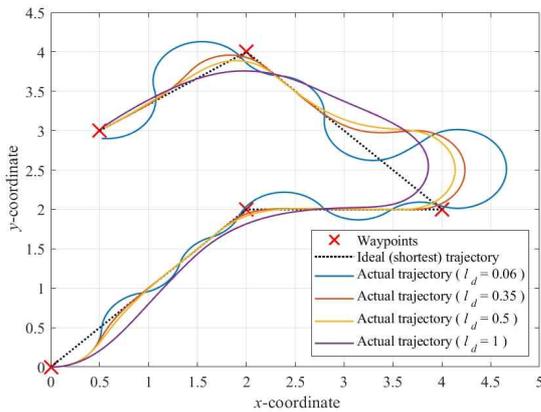


그림 3. 이상적인 구동 모델($\sigma^2 = 0$)에 대하여 전방 주시 거리에 따라 추종된 경로.

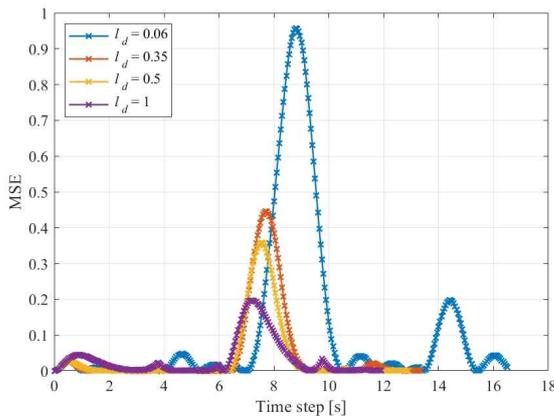


그림 4. 이상적인 구동 모델($\sigma^2 = 0$)에 대하여 전방 주시 거리에 따른 경로 추종 정확도.

III. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 고려하는 모바일 로봇 시스템에 대하여 전방 주시 거리(l_d)와 구동 모델 오류의 분산(σ^2)에 대한 경로 추종 정확도를 수치적으로 분석한다. 시뮬레이션에는 표 1에 기재된 파라미터를 이용하였고, 이상적인 경로와 실제 주행 경로를

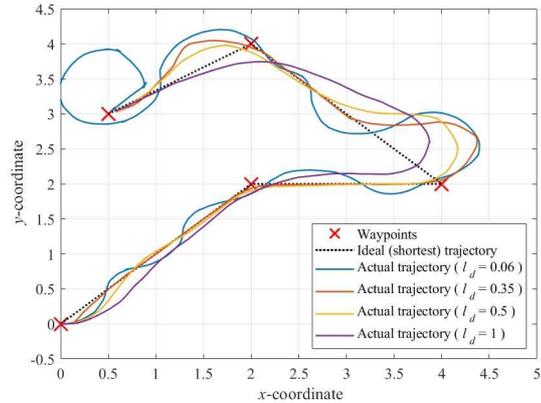


그림 5. 오류가 있는 구동 모델($\sigma^2 = 0.5$)에 대하여 전방 주시 거리에 따라 추종된 경로.

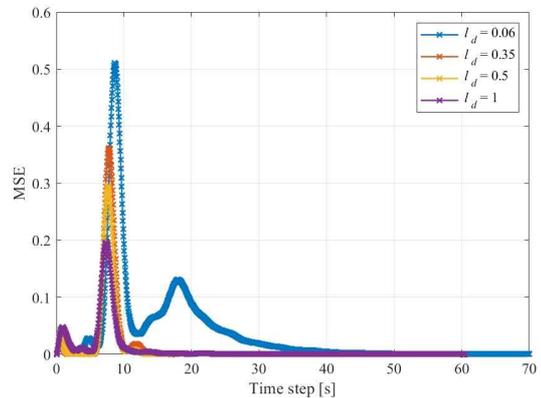


그림 6. 오류가 있는 구동 모델($\sigma^2 = 0.5$)에 대하여 전방 주시 거리에 따른 경로 추종 정확도.

비교 후 평균 제곱 오차(mean square error, MSE)를 계산함으로써 추적 정확도를 평가하였다.

그림 3과 4는 이상적인 구동 모델($\sigma^2 = 0$)을 가정하였을 때, 모바일 로봇 시스템의 경로 추종 성능을 보여준다. 그림 3의 추종된 경로로부터 전방 주시 거리 l_d 를 작게 설정할 때, 모바일 로봇이 5개의 지상점을 높은 정확도로 경유하지만 오버슈팅이 크게 발생함에 따라 이상적인 경로를 잘 추종하지 못하는 것을 확인하였다. 반대로 전방 주시 거리 l_d 를 크게 설정할 때, 오버슈팅이 완화되어 부드러운 경로로 주행하지만, 설정된 지상점을 정확히 경유하지 못하는 현상이 관찰된다. 그림 4의 MSE 평가 결과에서도 전방 주시 거리 l_d 의 설정에 따른 오버슈팅의 영향을 확인할 수 있다. 작은 l_d 를 설정하여 오버슈팅이 크게 발생한 경우, 이상적인 경로를 이탈함으로써 MSE가 크게 나타난 경우가 빈번히 관찰되며, 최종 지상점에 도달하기 위해 더 많은 시간이 소요된다.

그림 5와 6은 오류가 있는 구동 모델($\sigma^2 = 0.5$)

을 가정하였을 때의 경로 추적 성능을 보여준다. 그림 5는 특정 몬테카를로 시행에 대하여 추종된 경로를 표현한다. 그림 3의 결과와 비교하였을 때, 시스템에 불확실성이 첨가된다면 같은 전방 주시 거리를 설정하더라도 이상적인 경로를 더 크게 이탈할 수 있다는 사실이 관찰되었다. 그림 6은 10,000번의 몬테카를로 시행에 대한 MSE 성능을 보여준다. 이상적인 구동 모델을 가정하였을 때와 결과를 비교하였을 때, 최종 지상점에 도달하기 위하여 약 4~5배의 시간이 소요됨을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 차동 구동형 주행 모델이 적용된 모바일 로봇 시스템에 대하여 pure pursuit 알고리즘을 이용한 경로 추종 문제를 고려하였다. 이상적인 구동 모델과 오류가 있는 구동 모델을 고려하여 전방 주시 거리의 설정에 따른 pure pursuit 알고리즘의 추종 정확도의 민감성을 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 수치적 분석을 통하여 우수한 경로 추종 성능을 달성하기 위해서는 제어 파라미터 특성과 불확실성을 고려한 시스템의 설계 및 파라미터의 튜닝이 매우 중요하다는 사실을 확인하였다.

Acknowledgement

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2022R1G1A1010641).

References

- [1] 김동규. "경로 각도 오차 보정을 통한 pure pursuit 기반 복합 경로 추종 제어 알고리즘." *국내석사학위논문 성균관대학교 일반대학원*, 2021. 서울
- [2] 홍윤석. (2015). 자율주행자동차의 기능 및 안전성 평가 방안. *월간교통*, 13-18.
- [3] 주형진, 이기범. (2021). Pure-Pursuit 알고리즘의 피드백 제어 이득과 전방주시거리 설계에 따른 자율주행 자동차의 경로 추종 성능 변화. *한국자동차공학회 논문집*, 29(9), 839-846.
- [4] S. Thrun, W. Burgard, D. Fox, *Probabilistic robotics*, MIT Press, Cambridge, Mass, 2005.
- [5] J. M. Snider, "Automatic Steering Methods for Autonomous Automobile Path Tracking", Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, Tech. Report CMU-RI-TR-09-08, Feb. 2009.